

「空気圧入法」と「水分法」による 砂の間隙径分布

宇野尚雄¹・神谷浩二²・田中宏路³

¹フェロー 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科(同上)

³(株)大林組 東北支店(〒980-0011 仙台市青葉区上杉1-6-11)

土の間隙構造を表現する重要な要因である間隙径分布の計測手法として、筆者らが提案した「空気圧入法」は、複雑な間隙構造を毛管の集合体とみなす毛管モデルの仮定に基づいている。本論文では、この圧入法による間隙径分布と水分特性曲線から推定する「水分法」によるものを対比した。その結果、水分法による間隙径分布に較べて、圧入法によるものは粒度に関係なく分布範囲が狭く均等な分布型となること、平均間隙径は9割程度の大きさとなることが判明した。そして、手法の原理的相違性の観点から両手法による間隙径分布について考察し、関係付けを試みるとともに、圧入法における空気通過最小圧は、水分特性曲線から得られる空気侵入値の6割程度の大きさであることを認めた。

Key Words : void diameter, capillary model, air intrusion method, moisture characteristic curve, sand

1. はじめに

土の複雑な間隙構造を表現する重要な要因である間隙径分布を計測する手法として、筆者らは、「空気圧入法」(以下、圧入法と呼ぶ)を提案した¹⁾。これは、飽和土試料への空気圧入により、その圧入圧力と空気透過量の関係から間隙径分布を求める方法であり、簡便なものである。一方、間隙構造と水分特性曲線を関連づけて、水分特性曲線から間隙径分布を推定する手法(以下、水分法と呼ぶ)がある^{2), 3)}。これは、Childsら⁴⁾、Baver⁵⁾、Marshall⁶⁾、等によって述べられているけれども、計測した間隙径分布との対比は十分に検討されていない。

本論文は、砂質土に関して、圧入法により計測する間隙径分布と水分法により推定する分布を対比し、間隙構造の計測・推定及び表現法に関する指針を得ることを目的とするものである。いずれの手法も「間隙部分はまっすぐに連続した種々の直径の円形毛管の集合体である」とする一次的な毛管モデルの仮定に基づく。しかし、後述するように、圧入法による間隙径分布は均等になり易いのに対して、水分法のそれはより広い範囲の間隙径分布になるため、間隙径の変化する複雑な間隙構造の三次元的影響を受

けていると想像され、両者の分布差の意味を考察することにより、間隙構造の理解を深められ、地盤注入材の砂質土の間隙への侵入・滞留・付着の機構解明(本論文では議論しない)等に繋がると期待される。

本文では、最初に水分特性曲線から間隙径分布を推定する手法を整理した後、両手法による間隙径分布を対比した結果を示す。そして、両手法の原理的な違いを対比しながら、圧入法の間隙径分布や両手法の間隙径分布の関係について考察し、また、水分特性曲線から得られるBrooksらの空気侵入値に対して⁷⁾、圧入法の空気通過最小圧を比較する。

2. 水分法による間隙径分布

(1) 推定方法

図-1のように、任意の高さの毛管モデル中を水が毛管上昇しているとき、その毛管束の含水状態は土の水分特性曲線に等しいとして、求められる毛管束の管径分布を土の間隙径分布とみなす方法である。参考文献2)、3)に記載されている手法を整理すると以下のようである。

図-1の毛管束を任意の高さで切断したとき、直径が d_m (mm)から $d_m+d(d_m)$ の間にある毛管が占める

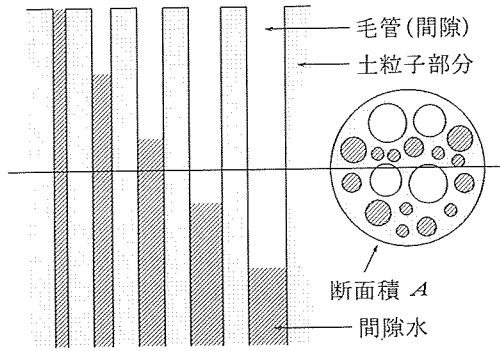


図-1 毛管束の含水状態

断面積 dA_v (cm^2) の、毛管束(試料層)の全断面積 A (cm^2) に対する割合を次のように表す。

$$\frac{dA_v}{A} = f(d_m) d(d_m) \quad (1)$$

ここに、 $f(d_m)$: 毛管径の分布密度関数
これは、毛管束のある切断面においてある大きさの毛管が存在する確率を表している。そして、その毛管束の面積率、即ち、間隙率 n は次式で与えられる。

$$n = \int_{A_{v,\min}}^{A_{v,\max}} \frac{dA_v}{A} = \int_{d_{m,\min}}^{d_{m,\max}} f(d_m) d(d_m) \quad (2)$$

ここに、 $A_{v,\max}$: 最大毛管径 $d_{m,\max}$ (mm) を有する毛管部分の断面積 (cm^2)

$A_{v,\min}$: 最小毛管径 $d_{m,\min}$ (mm) を有する毛管部分の断面積 (cm^2)

一方、毛管束の任意の高さの切断面において、水で満たされている毛管部分の面積率、即ち、体積含水率 θ は、式(2)に基づいて、次式によって表される。

$$\theta = \int_{d_{m,\min}}^{d_{m,i}} f(d_m) d(d_m), \quad f(d_m) = \frac{d\theta}{d(d_m)} \quad (3)$$

ここに、 $d_{m,i}$: 水で満たされている毛管部分の内の最大の毛管径 (mm)

ところで、毛管径 d_m (mm) は、毛管上昇高さ、即ち、サクシオン h_p (cm) から次式により算出される。

$$d_m = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_p} \cdot 10^4 \quad (4)$$

ここに、 σ : 水の表面張力 (N/m) (水温 $T_w = 15^\circ\text{C}$ のとき $\sigma = 73.48 \times 10^{-3}$ (N/m))

ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)

g : 重力加速度 (cm/s^2)

式(4)を微分して、

$$d(d_m) = -\frac{4\sigma}{\rho_w g h_p^2} \cdot 10^4 dh_p = -\frac{d_m}{h_p} dh_p \quad (5)$$

更に、式(5)に式(4)を代入すると次式が得られる。

$$\frac{dh_p}{d(d_m)} = -\frac{h_p}{d_m} = -\frac{4\sigma}{\rho_w g d_m^2} \cdot 10^4 \quad (6)$$

そして、式(3)、(6)より、 $f(d_m)$ は次式で表される。

$$f(d_m) = \frac{dh_p}{d(d_m)} \frac{d\theta}{dh_p} = -\frac{4\sigma}{\rho_w g d_m^2} \cdot 10^4 \frac{d\theta}{dh_p} \quad (7)$$

よって、 $\theta \sim h_p$ (負圧を正とする) 関係で表す土の水分特性曲線が毛管束のそれと等しいとすれば、式(4)により間隙径 d_m が、式(7)により間隙径の分布密度関数 $f(d_m)$ がそれぞれ求められる。

次に、本論文では、間隙量を表す累積間隙体積百分率 V_r (%) を次式により定義する。

$$V_r = \frac{\int_{d_{m,\min}}^{d_{m,i}} f(d_m) d(d_m)}{\int_{d_{m,\min}}^{d_{m,\max}} f(d_m) d(d_m)} \cdot 10^2 \quad (8)$$

これは、式(2)、(3)より次のように書き換えられる。

$$V_r = \frac{\theta}{n} \cdot 10^2 = S_r \quad (9)$$

ここに、 S_r : 飽和度 (%)

即ち、 $\theta \sim h_p$ 関係で表す水分特性曲線を $S_r \sim h_p$ 関係で表現し直し、 h_p を式(4)により d_m に換算すれば、 $d_m \sim V_r (=S_r)$ 関係で間隙径分布を表すことができる。

(2) 水分特性曲線

図-2 は、吸引法の一つであるサクシオンプレート法(試料層は直径 50mm、高さ $L=20$ mm の円柱体)により計測した排水過程、浸透過程での水分特性曲線をそれぞれ示したものである⁸⁾。図中の一点鎖線、二点鎖線及び破線は、水分特性曲線の全体像を調べるために、次の van Genuchten の水分特性曲線の推定式：

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cdot 10^2 = \frac{1}{\{1 + (\alpha h_p)^{n^*}\}^m} \cdot 10^2 \quad (10)$$

但し、 $m = 1 - 1/n^*$

ここに、 S_e : 有効飽和度 (%)

θ_r : 残留体積含水率

θ_s : 飽和体積含水率

α : 土の種類で決まるパラメータ ($1/\text{cm}$)

n^* : 土の種類で決まるパラメータ

により⁹⁾、 $\theta_r = 0$ 、 $\theta_s = n$ と仮定して、計測値に対して最小二乗法により近似したものである。表-1 には、各計測試料に関する α 、 n^* を示した。

(3) 間隙径分布

図-2 のそれぞれを 90° 左回転して、横軸のサク

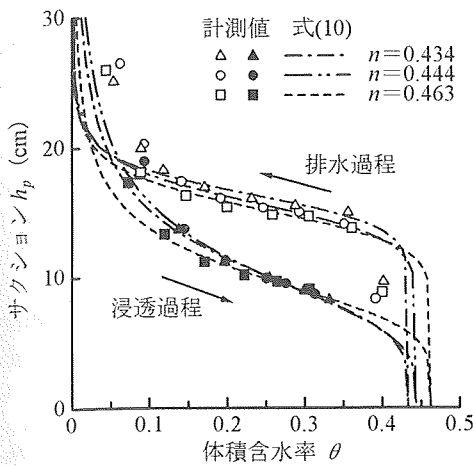


図-2(a) 水分特性曲線(粗砂)

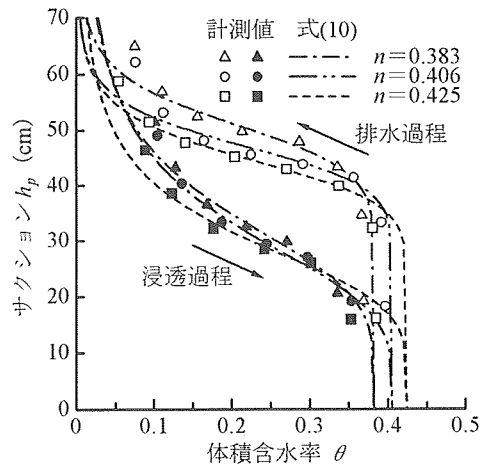


図-2(c) 水分特性曲線(標準砂)

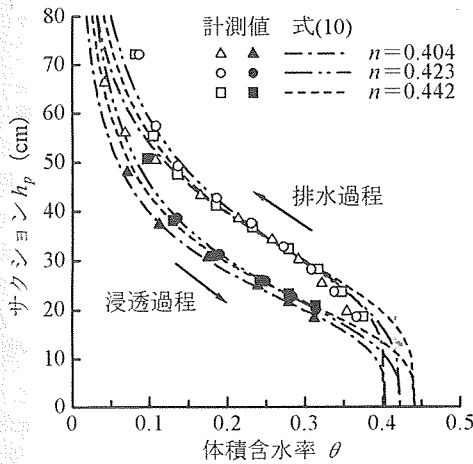


図-2(b) 水分特性曲線(混合砂)

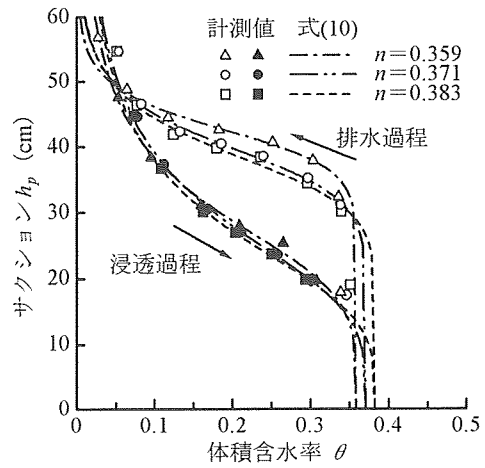


図-2(d) 水分特性曲線(GB-AC(ガラスビーズ))

表-1 van Genuchten 式(10)におけるパラメータ α , n^*

試料名称	間隙率 n	過程	α	n^*
粗砂	0.434	排水	0.0613	12.584
		浸透	0.1012	4.159
	0.444	排水	0.0641	10.546
		浸透	0.1040	3.806
	0.463	排水	0.0664	10.451
		浸透	0.1056	4.812
混合砂	0.404	排水	0.0281	4.078
		浸透	0.0418	3.543
	0.423	排水	0.0296	3.431
		浸透	0.0412	3.163
	0.442	排水	0.0304	3.643
		浸透	0.0425	3.306
標準砂	0.383	排水	0.0196	11.538
		浸透	0.0305	4.489
	0.406	排水	0.0212	12.298
		浸透	0.0335	4.083
	0.425	排水	0.0225	10.771
		浸透	0.0349	4.805
GB-AC	0.359	排水	0.0235	13.631
		浸透	0.0356	4.548
	0.371	排水	0.0251	9.666
		浸透	0.0381	3.914
	0.383	排水	0.0260	8.885
		浸透	0.0402	3.868

シヨン h_p を式(4)により間隙径 d_m に変換したものを対数スケールで表示し、縦軸の体積含水率 θ を式(9)により累積間隙体積百分率 V_v に変換したのが図-3であり、粒度、均等係数 U_c 、次式(11)で算出する平

均粒径 $D_w(\text{mm})^{1.0}$ 、及び後述の圧入法による間隙径分布をそれぞれ併せて示した。

$$D_w = 1 / \sum (P_i / D_i) \quad (11)$$

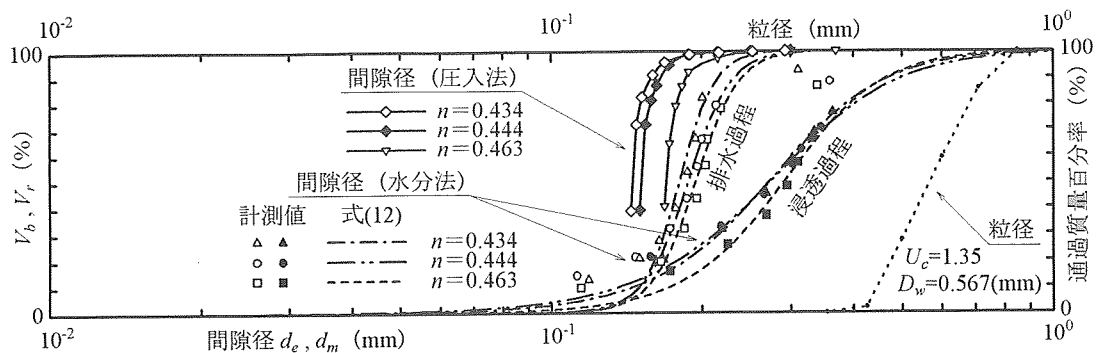


図-3(a) 水分法と圧入法による間隙径分布の対比(粗砂)

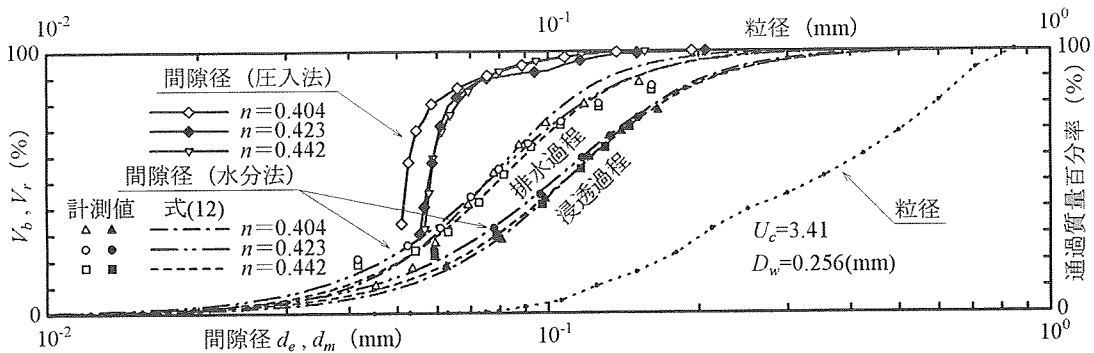


図-3(b) 水分法と圧入法による間隙径分布の対比(混合砂)

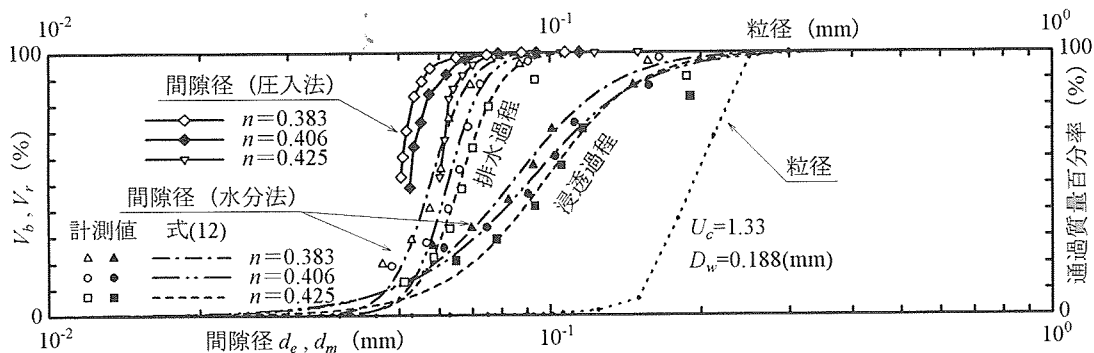


図-3(c) 水分法と圧入法による間隙径分布の対比(標準砂)

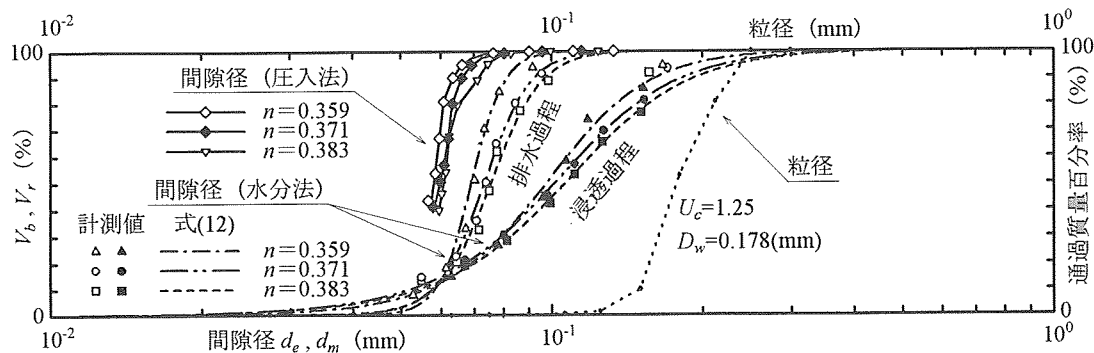


図-3(d) 水分法と圧入法による間隙径分布の対比(GB-AC)

ここに、 P_i : ある粒径範囲の中間径 D_i (mm)を有する試料の質量が全試料質量に対して占める割合。本論では、 D_i は粒度試験(ふるい分け法)に用いたふるいのJIS目開き 0.850, 0.710, 0.600, 0.500, 0.425, 0.355, 0.300, 0.250, 0.212, 0.180, 0.150, 0.125, 0.106, 0.090, 0.075, 0.063, 0.053, 0.045, 0.038, 0.032(単位はmm)の中間径とした。

図中の一点鎖線、二点鎖線及び破線は間隙径分布の全体像を調べるために、式(10)に式(4)を代入し、 $\theta_r=0$, $\theta_s=n$ と仮定して式(9)の関係に基づいて書き換えた次式を、表-1の α , n^* を用いて、それぞれ図示したものである。

$$V_r = \frac{1}{\left\{1 + \left(\alpha \frac{4\sigma}{\rho_w g d_m} \cdot 10^4\right)^{n^*}\right\}^m} \cdot 10^2 \quad (12)$$

図-2の排水と浸透過程での水分特性曲線のヒステレシスのため、図-3のように同一の試料、間隙率に対して2つの間隙径分布が得られる。しかしながら、後述の圧入法による間隙径分布との対比には、圧入法によるものが空気圧入に伴う間隙水の排水過程で得られるため、水分法の排水過程でのものを用いるのが適切と考える。以下に述べる水分法による間隙径分布は、排水過程でのものである。

図-3によれば、水分法による間隙径分布は粒度を粒径軸方向に平行移動したような分布型を示し、また、 U_e の増加に伴い分布範囲は広くなり、間隙率の増加に伴い間隙径軸方向に平行移動して間隙径が大きくなる傾向にそれぞれある。

一方、粒径に対する間隙径の大きさに関して、図-4は、次式(13)で定義して算出する水分法による平均間隙径 d_m^* (mm)の平均粒径 D_w に対する比を間隙比 e に対して示したものであるが(後述する e と圧入法による平均間隙径 d_e^* (mm)の D_w に対する比の関係も併記)、 $d_m^*/D_w=0.25\sim 0.4$ の大きさである。

$$\begin{aligned} d_m^* &= 4 \frac{V_v}{S} \cdot 10 = 4 \frac{\int_{A_{v,min}}^{A_{v,max}} dA_v}{\int_{A_{v,min}}^{A_{v,max}} \left\{ \frac{d_m}{10} \right\} dA_v} \cdot 10 \\ &= \frac{\int_{d_{m,min}}^{d_{m,max}} f(d_m) d(d_m)}{\int_{d_{m,min}}^{d_{m,max}} \frac{f(d_m)}{d_m} d(d_m)} \quad (13) \end{aligned}$$

ここに、 V_v : 評価された間隙部分の全体積 (cm³)

S : 評価された間隙部分の全表面積 (cm²)

なお、各々の試料、間隙率での d_m^* は、図-3の水分

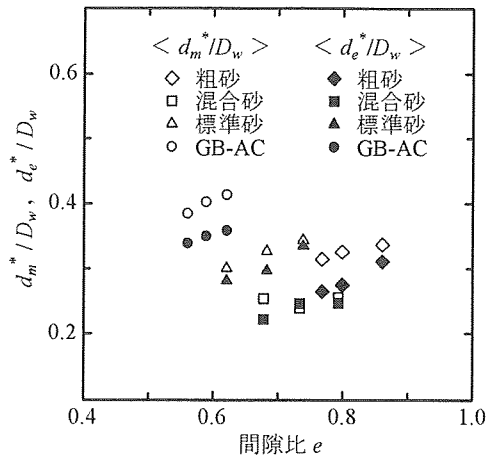


図-4 間隙比と平均間隙径・平均粒径との関係

法による間隙径分布にフィッティングさせたときの式(12)による分布を用いて式(13)で算出している。

3. 圧入法による間隙径分布

(1) 計測原理及び整理法¹⁾

蒸留水で飽和した試料層(直径80mm, 高さ $L=30$ mmの円柱体)の底面から空気圧力水頭 h_a (cm)を与えるとき、空気圧が $h_{a,min}$ (cm)になるときに空気が鉛直上向きに試料層中を流れ始める¹⁾。更に、空気圧を徐々に増加すると、 h_a と飽和試料層を通過する空気の流量 Q_a (cm³/s)との関係は、図-5の②のように、空気圧が $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ (cm)の範囲では曲線関係となり、 $h_{a,max}$ より大きくなるときは乾燥試料の直線関係①を h_a 軸方向に平行移動した関係と一致する。

関係②において、ある空気圧 $h_{a,i}$ のときの固有透過度 k_i (cm²)、透気係数 $k_{a,i}$ (cm/s)は、次式によってそれぞれ表される。

$$k_i = \frac{\eta_a L}{\rho_w g A} \frac{Q_{a,i}}{h_{a,i} - h_{a0,i}} \cdot 10, \quad k_{a,i} = \frac{L}{A} \frac{Q_{a,i}}{h_{a,i} - h_{a0,i}} \quad (14)$$

ここに、 η_a : 空気の粘性係数 (Pa·s)

$h_{a0,i}$: 図-5の曲線関係②の $h_{a,i}$ の点での接線と h_a 軸との交点によって表される空気圧力水頭 (cm)

ところで、毛管モデルの仮定に基づいて、間隙径 d_e (mm)は空気圧から次式によって算出される¹⁾。

$$d_{e,i} = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_{a,i}} \cdot 10^4 \quad (15)$$

一方、Bearによって紹介されている毛管モデルに関する固有透過度を表す式に基づけば^{1,1)}、 $h_{a,i}$ のとき

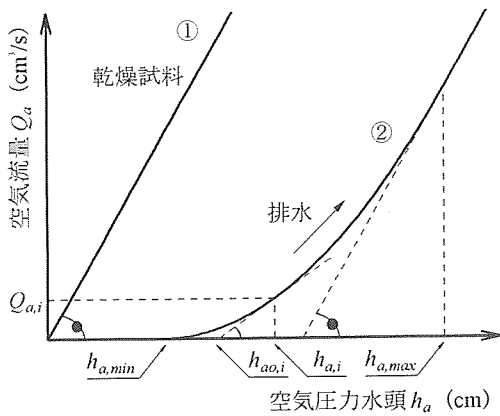


図-5(a) 空気圧力水頭と空気流量(概略)

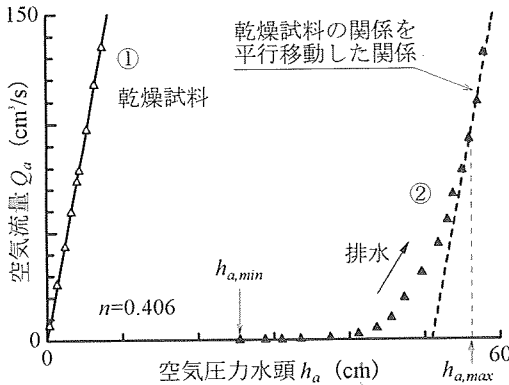


図-5(b) 空気圧力水頭と空気流量(計測例・標準砂)

に空気圧によって間隙水が押し出され空気が流れた間隙部分の間隙率 $n_{b,i}$ (累積間隙率と称す) は、式(14)から算出する k_i と式(15)から算出する $d_{e,i}$ をそれぞれ用いて、次式で算出される¹⁾。

$$\Delta n_{b,j} = \frac{32\Delta k_j}{(d_{e,j}/10)^2}, \quad \Delta k_j = k_j - k_{j-1} \quad (16a)$$

$$n_{b,i} = \sum_{j=1}^i \Delta n_{b,j} \quad (16b)$$

ここに、 $\Delta n_{b,j}$: 間隙径 $d_{e,j}$ の大きさを有する間隙部分の間隙率

Δk_j : 間隙径 $d_{e,j}$ の大きさを有する間隙部分の固有透過度 (cm^2)

この $n_{b,i}$ を用いて、累積間隙体積百分率 V_b (%) を次式により定義し算出する。

$$V_{b,i} = \left(1 - \frac{n_{b,i}}{n}\right) \cdot 10^2 \quad (17)$$

間隙径分布は、式(15)から算出する d_e と式(17)から算出する V_b の関係で表すことができる。

(2) 計測結果

図-3 に示したように、圧入法による間隙径は、 U_c の増加に伴い分布範囲が広がる傾向にあるものの、狭い範囲での分布頻度がかかなり高く、均等な分布型を示す傾向にある。また、間隙径分布は、間隙率の変化に伴い間隙径軸方向に平行移動する傾向にある。一方、圧入法の間隙径分布の代表径としての平均間隙径 d_e^* (mm) を次式で定義して¹⁾、

$$d_e^* = \frac{\sum \Delta n_{b,i}}{\sum (\Delta n_{b,i}/d_{e,i})} \quad (18)$$

e と d_e^* の D_w に対する比の関係を調べた図-4 によれば、 $d_e^*/D_w = 0.2 \sim 0.35$ の大きさで、水分法による d_m^*/D_w より少し小さい。

4. 圧入法と水分法による間隙径分布の対比

図-3 によれば、圧入法による間隙径分布は、水分法による分布と同じ範囲内にあるものの、式(15)の $h_{a,i}$ を図-5 の $h_{a,min}$ で代用して求まる最大径 $d_{e,max}$ より大きな間隙径や $h_{a,i}$ を $h_{a,max}$ で代用して求まる最小径 $d_{e,min}$ より小さな径が計測され難いため分布範囲は狭く、また、水分法によるものに較べて均等な分布型となる。一方、図-6 によれば、圧入法の平均間隙径 d_e^* は水分法の平均間隙径 d_m^* の 9 割程度の大きさになっているが、次の(1)で述べるように、両者は同等のものと考えられる。

圧入法では飽和砂への空気圧入によって、試料層下端から上端に至る空気の流れる道が連続して形成された間隙部分を毛管束で近似するのに対し、水分法では間隙内に三次元的に形成される水-空気界面構造を毛管束で近似するという原理的な違いが影響していると考えられ、以下に考察する。

(1) 間隙径 d_e と d_m

圧入法と水分法による間隙径 d_e 、 d_m を求めるそれぞれ式(15)と式(4)を比較すると次のようである。

$$\frac{d_e}{d_m} = \frac{h_p}{h_a} \quad (19)$$

一般に、サクシオン h_p は、 $h_p = h_a - h_w$ (h_w : 水の圧力水頭 (cm)) で表現されるため、圧入法で空気を圧入した時の試料層内の h_w を $h_w = 0$ とみなせば、 $h_p = h_a$ となり、式(19)より $d_m = d_e$ となる。しかしながら、水分法での h_p は試料層内の間隙水の存在状態が平衡時のサクシオンであるのに対して、圧入法での h_a は間隙水を押し出し空気が生じるときの空気圧で、 h_p とは異なる量であるので、以下に調べる。

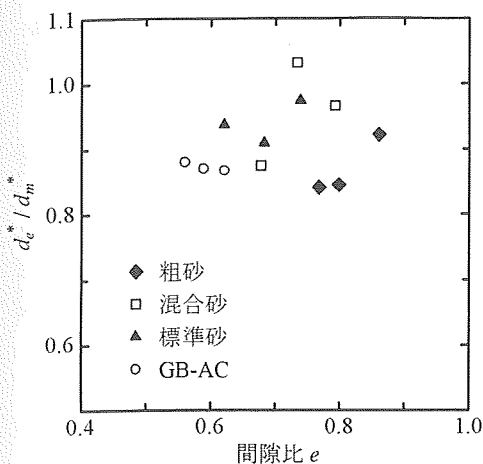


図-6 平均間隙径 d_e^* と d_m^*

圧入法では、ある空気圧 $h_{a,i}$ のときの含水量を計測していないので、 $\theta \sim h_a$ 関係と水分特性曲線とを対比できないため、圧入法の式(14)で得られる透気係数と h_a , h_p との対応で検討する。

図-7は、図-2(c), (d)に示した $\theta \sim h_p$ 関係を飽和度 $S_r \sim h_p$ 関係で表現し直したもの(図中の実線、破線はそれぞれ van Genuchten 式(10)による関係)と、間隙水の存在が平衡状態とみなした湿潤土試料についての一次元透気試験により得られた S_r と比透気係数 k_{at}/k_{ad} (k_{at} : 湿潤土の透気係数 (cm/s), k_{ad} : 炉乾燥土の透気係数 (cm/s)) の関係^{12), 13)} を対比して示したものである。そして、ある S_r に対応する $h_p, k_{at}/k_{ad}$ をそれぞれ読み取り、 $k_{at}/k_{ad} \sim h_p$ 関係を調べたのが図-8である(但し、いずれの試料についても $S_r \sim h_p$ 関係の間隙率 n と $S_r \sim k_{at}/k_{ad}$ 関係の n は若干異なる)。一方、圧入法において、式(14)の透気係数 $k_{a,i}$ は、ある飽和度に対応して得られる値であるため、 $k_{at}/k_{ad} = k_{a,i}/k_{ad}$ として、 $k_{at}/k_{ad} \sim h_{a,i}$ 関係を図-8に重ね合わせて示した。 $k_{at}/k_{ad} \sim h_p$ 関係と $k_{at}/k_{ad} \sim h_{a,i}$ 関係はほぼ同一の関係になり、 $h_a \approx h_p$ である。従って、式(19)より $d_e \approx d_m$ であり、毛管径として同型の式で定義する両手法の間隙径は同程度のものと評価される。即ち、図-6の平均間隙径 d_e^* と d_m^* のずれは、 d_e^* , d_m^* をそれぞれ算出するのに用いる間隙体積を必要要因 (Δn_b と $f(d_m)$) や表現される分布の範囲の違いによるものである。

(2) 両手法による分布の相違

$h_a \approx h_p$ であるので、図-5の $h_{a,min}$, $h_{a,max}$ の値を h_p の値に置換し、図-2からその h_p に対応する θ を求め更に S_r に換算して、各々の試料、間隙率での $h_{a,min}$, $h_{a,max}$ に対応する含水量を推定すると、いずれについ

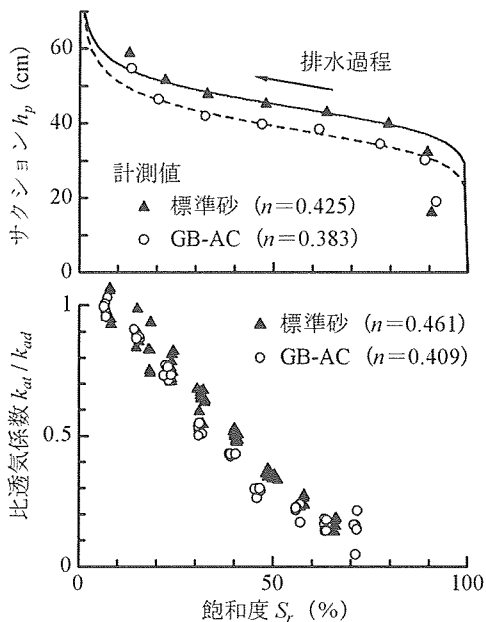


図-7 飽和度とサクシヨン h_p , 比透気係数の関係

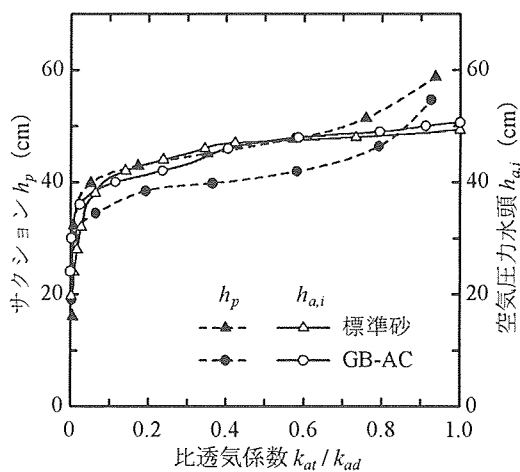


図-8 サクシヨン h_p と式(14)の空気圧力水頭 $h_{a,i}$

ても $h_{a,min}$ のとき $S_r=90\%$ 程度、 $h_{a,max}$ のとき $S_r=20\%$ 程度である。このことから、圧入法では、 $h_{a,min}$ より小さな空気圧のとき飽和試料層を通過する空気流が生じないが空気は侵入していること、 $h_{a,max}$ より大きな空気圧のとき微細な間隙部分や空気流に垂直な方向の間隙部分の間隙水が押し出されず、そのような間隙部分が空気流に寄与し難いことが考えられる。

この結果、圧入法で評価する間隙体積は形成された空気道の部分に相当し、水分法の同じ間隙径に対する間隙体積は間隙の三次元的空間からの排水量に相当し、これが、図-3の両手法による間隙径分布のずれとして、圧入法による分布の範囲が水分法によるものより狭くなり、累積間隙体積百分率として

の圧入法の V_b が水分法の V_r よりも大きくなる原因と考えられる。また、圧入法による分布計測値の妥当性は毛管模型によって確認している¹⁾、圧入法からの水分法による分布のずれは、毛管モデルからのずれとして「間隙が瘤状に広くなったり狭くなったり」する結果によると判断できよう。このことは、間隙構造の表現に指針を与えるものであり、いずれの間隙径分布が良いかという観点ではなく、その特徴に合わせて分布を活用することが期待される。

(3) 両手法の間隙径分布の関係付け

Wittmann¹⁴⁾、Kenney らは¹⁵⁾、フィルタ層は、図-9 のように、間隙径 $d_p(\text{mm}) \sim p(\%)$ (p : ある間隙径より小さい径を有する間隙部分の全間隙に対する割合) 関係で表される間隙径分布を有する微小厚さの多孔板が m^* 枚から成るとする仮定で、ある間隙径に等しい粒径 $D_p(\text{mm})$ を有する土粒子がフィルタ層を通過しない確率 P' (%) を次式で与えた。

$$P' = \left\{ 1 - (1 - p/10)^{m^*} \right\} \cdot 10^2, \quad m^* = L_F / D_F \quad (20)$$

ここに、 L_F : フィルタ層厚さ (mm)

D_F : フィルタ材の代表粒径 (mm)

これは、間隙が瘤状に広くなったり狭くなったりするために、粒子通過は小さめの間隙径に依存し、また、フィルタ層が厚いほど、指数 m^* が大きくなり、大きめの粒子が通過し難くなることを表現したものである。即ち、式(20)により、大きい瘤がある多孔板の間隙径分布 $d_p \sim p$ を粒子通過に支配的な小さめの瘤の間隙径分布 $d_p \sim P'$ に表現し直すことができる。

上記の「粒子通過」を圧入法の「空気通過」に置き換えて、式(20)の p を水分法の V_r 、 P' を圧入法の V_b とみなして、「大きい瘤がある間隙径分布を示す水分法による分布」から「毛管で表現した圧入法による分布」に修正を試みた例を図-10 に示す。いずれも $m^*=3$ のときが比較的に合致しているが、混合砂は分布型がずれて現れ、均等な標準砂の方が良く表現されているように見える。一方、 m^* 値は、式(20)の L_F を圧入法の試料高さ L 、 D_F を平均粒径 D_w とすると、混合砂で $m^*=30/0.256 \approx 117$ 、標準砂で $m^*=160$ となり、フィッティングされたときの m^* に較べてかなり大きい。圧入法で生じる空気流は大きい間隙径部分を探索するべく曲がることのできるため、多孔板1枚の厚さを D_F よりも厚くする方が修正対応が良くなり、結果的に m^* 値が小さく評価されると考えられる。Childs らが水分法による間隙径分布から透水係数を表現するために⁴⁾、2枚の多孔板の結びつきを考えた理由もここにあるかも知れない。

水分法による分布は、式(20)に基づく修正により、

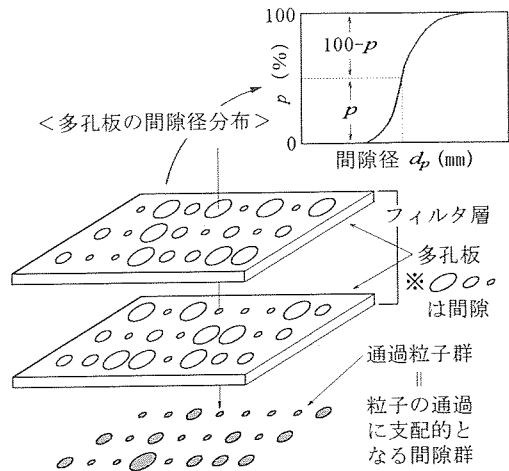


図-9 フィルタ層の粒子通過の概念^{14), 15)}

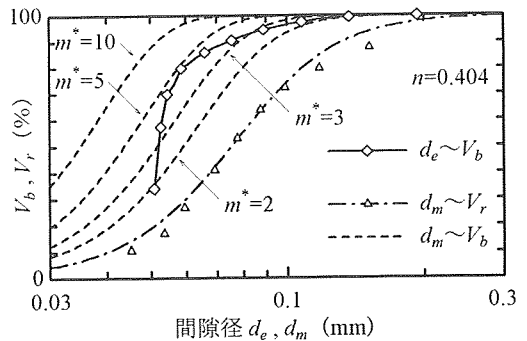


図-10(a) 水分法による間隙径分布の修正(混合砂)

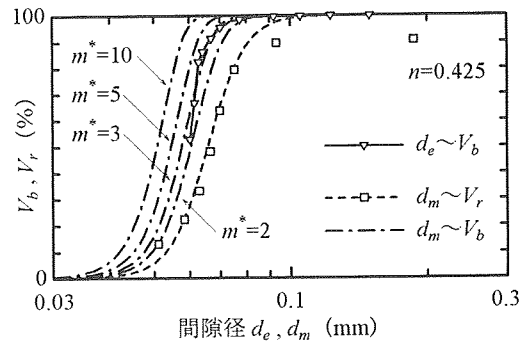


図-10(b) 水分法による間隙径分布の修正(標準砂)

大きめの間隙径部分が現れ難くなり、更にその部分が小さめの間隙径部分の体積評価に含まれ、そして、圧入法による均等な分布に近づく。即ち、三次元的空間からの排水にかかわる間隙部分を表現する水分法と空気通過のみにかかわる部分を毛管表現する圧入法による間隙径分布の関係は、間隙体積評価の違いとすることで解釈される。

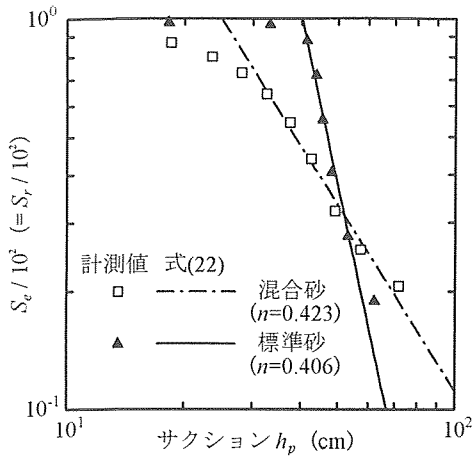


図-11 空気侵入値 h_b , パラメータ λ の算出の例

(4) 空気侵入値と圧入法での空気通過最小圧

圧入法において、飽和試料層を空気が流れ始めるときの空気通過最小圧 $h_{a,min}$ の意味を Air Entry Value (AEV と略称) と同意義で使用されている空気侵入値との関連で若干考察したい。

Brooks らによる水分特性曲線の推定式は⁷⁾,

$$S_e \left(= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cdot 10^2 \right) = \left(\frac{h_b}{h_p} \right)^\lambda \cdot 10^2, \quad h_b \geq h_p \quad (21)$$

ここに、 h_b : 空気侵入値 (cm)

λ : 土の種類で決まるパラメータ (Brooks らは空隙径分布指数 (Pore Size Distribution Index) と称している)

であり、この式の両辺を 10^2 で除して、更に、両辺の対数をとると次式となる。

$$\log(S_e / 10^2) = \lambda (\log h_b - \log h_p) \quad (22)$$

図-11 のように、 $\log h_p \sim \log(S_e / 10^2)$ 関係を直線で近似し、その直線上の $S_e / 10^2 = 1$ のときのサクシオンから h_b が、直線の傾きから λ がそれぞれ求まる。表-2 には、式(21)の $\theta_r = 0$, $\theta_s = n$ と仮定して、図-2 のそれぞれの水分特性曲線に対して図-11 の整理で求めた h_b , λ をそれぞれ示した。図-3 や表-2 によれば、 h_b は D_w が小さくなるに伴い大きくなり、 λ は水分法の間隙径分布が緩やかとなるに伴い小さくなる傾向にそれぞれある⁷⁾。

図-12 は、表-2 の h_b に対して各々の試料、空隙率について圧入法で計測された $h_{a,min}$ の関係を示したもので、圧入法で決定し難い $h_{a,min}$ は h_b の 6 割程度の大きさであることが認められる。

表-2 式(21)における空気侵入値 h_b , パラメータ λ

試料名称	空隙率 n	過程	h_b (cm)	λ
粗砂	0.434	排水	14.2	5.075
	0.444	排水	13.1	3.761
	0.463	排水	13.1	4.978
混合砂	0.404	排水	31.0	2.844
	0.423	排水	24.9	1.576
	0.442	排水	24.8	1.727
標準砂	0.383	排水	44.8	5.178
	0.406	排水	40.3	4.540
	0.425	排水	38.2	4.701
GB-AC	0.359	排水	38.9	7.609
	0.371	排水	35.4	5.226
	0.383	排水	34.9	5.557

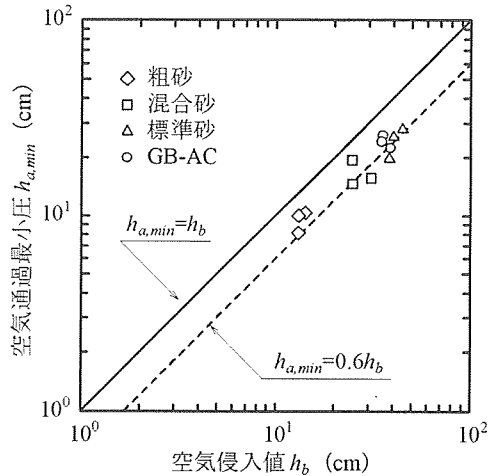


図-12 空気侵入値 h_b と空気通過最小圧 $h_{a,min}$

5. おわりに

本論文は、空隙径分布を計測するために提案した圧入法に対して、水分特性曲線による水分法を用いて得られる砂の空隙径分布を対比するとともに、圧入法の間隙径分布や両手法の分布の関係について考察した。その結果、以下の事項が判明した。

- (1) 水分法による空隙径分布は水分特性曲線を 90° 左回転した形状になり、それは粒度分布を平行移動したような分布型となる。それに対し、圧入法によるものは、粒度に関係なく分布範囲が狭く均等な分布型となる傾向にある。また、圧入法の平均空隙径 d_e^* は、水分法の平均径 d_m^* の約 9 割の大きさである。
- (2) 圧入法における飽和試料への圧入空気圧 h_a は水分法におけるサクシオン h_p に相当する。また、 $h_a \sim$ 比透気係数 k_{at}/k_{ad} 関係と $h_p \sim k_{at}/k_{ad}$ 関係が同一の関係となり、圧入法による空隙径 d_e と水分法による空隙径 d_m は同じものと評価される。その結果、上記(1)の d_e^* と d_m^* の差は、平均径の算出に係る次の(3)に述べる累積空隙体積百分率の差による影響である。

(3) 圧入法と水分法による間隙径分布のずれは、間隙体積を表現する累積間隙体積百分率としての圧入法の V_b が毛管形状の空気道の間隙部分に相当するのに対し、水分法の V_w が瘤状に広くなったり狭くなったりする間隙の三次元的空間からの排水量に相当するという違いによるものである。そのため、Wittmann 等によって示されたフィルタ層の粒子通過の確率モデルに基づいて瘤状の間隙の影響を表現するため、水分法の累積間隙体積百分率 V_w を修正したところ、その修正 V_b は圧入法の累積間隙体積百分率 V_b と比較的合致する。

(4) 圧入法の飽和試料中に空気流が生じ始めるときの空気通過最小圧力 $h_{a,min}$ は、水分特性曲線から得られる空気侵入値とか AEV に相当する h_b の 6 割程度大きさである。

本研究は平成 7 年度、平成 8 年度の文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)、課題番号:07455189、研究代表者:宇野尚雄)の補助を受けた。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 神谷浩二, 宇野尚雄, 松島健之:「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.189-198, 1996.
- 2) Morel-Seytoux, H. J.: Introduction to Flow of Immiscible Liquids in Porous Media, *Flow through Porous Media* (edited by De Wiest, R. J. M.), Academic Press, Inc., pp.455-516, 1969.
- 3) 土壌物理研究会編:土の物理学—土質工学の基礎—, 森北出版, pp.199-238, 1979.
- 4) Childs, E. C. and Collis-George, N.: The Permeability of Porous Materials, *Proceedings of the Royal Society of London, Ser.A*, Vol.201, pp.392-405, 1950.
- 5) Baver, L. D.: *Soil Physics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp.270-272, 1956.
- 6) Marshall, T. J.: A Relation between Permeability and Size Distribution of Pores, *The Journal of Soil Science*, Vol.9, No.1, pp.1-8, 1958.
- 7) Brooks, R. H. and Corey, A. T.: Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.92, No.1R2, pp.61-88, 1966.
- 8) 宇野尚雄, 佐藤 健, 柘植浩史: 2、3 の砂質土の水分保持特性, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp.187-192, 1987.
- 9) van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 10) 土質工学会編:土質工学ハンドブック, 土質工学会, p.69, 1982.
- 11) Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Company, Inc., pp.161-164, 1972.
- 12) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.25-34, 1993.
- 13) 宇野尚雄, 神谷浩二, 鬼頭明義, 杉井俊夫: 湿潤土の透気係数について, 第 5 回地盤工学シンポジウム論文集(土質工学会中部支部), pp.77-82, 1993.
- 14) Wittmann, L.: The Process of Soil-Filtration—Its Physics in Engineering Practice, *Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.303-310, 1979.
- 15) Kenney, T. C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G. I., Omange, G. N. and Ume, C. A.: Controlling Constriction Sizes of Granular Filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.22, pp.32-43, 1985.

(1997. 7. 18 受付)

THE DISTRIBUTION OF SAND VOID DIAMETER BY AIR INTRUSION METHOD AND MOISTURE CHARACTERISTIC CURVE METHOD

Takao UNO, Kohji KAMIYA and Kohji TANAKA

The air intrusion method based on the capillary model was produced to measure the distribution of soil void diameter. In the present paper, the void diameter distribution measured by air intrusion method is compared with the one estimated from moisture characteristic curve. As a result, it is shown that the shape and range of void diameter distributions by air intrusion method become more uniform and more narrow than the distributions by moisture characteristic curve, respectively, and that the mean void diameters by air intrusion method correspond to 90% of that by moisture characteristic, with consideration of the connecting relationship between both curves, and so on.